

貯水による地震の発生について

飯 田 汲 事

Seismic Activity Associated with the Filling of Reservoir

Kumizi IIDA

ダム貯水による地震の発生が1940年以来問題になっているので、その問題を調べた。外国においては地震の発生によりダムに被害を与えた例が多い。地震の発生と貯水量・ダムの高さ・貯水速度・地盤の状態との関係を示した。また日本においてもダムの貯水池付近で地震活動が増加した若干の例があるので、それらについて述べ、水と地震との関係例にも言及した。

1. まえがき

貯水と地震発生との問題は、1940年以来世界各地において論じられるようになった。ダムの貯水により地震が発生し、その地震によってダムが被害を受けた例は2〜3にとどまらない。特に外国においては被害地震の発生がみられている。幸いにわが国では、まだダムの被害がみられるような地震の発生がみられていないが、地震活動が増加したという例もある。従来から地震活動がみられた地域でダムが作られても被害地震が起こらない地域、地震活動がほとんどみられなかった地域でダムの建設が行われ、貯水につれて地震活動が盛んになった地域または一度地震活動がみられたがその後やんでしまった地域などいろいろな場合があらわれている。これらについて貯水量・貯水速度・ダムの高さ・地盤の状態なども考察した。なお水に関連して発生したと思われる地震についても若干例を示すことにした。

2. 地震の発生をみた貯水ダムの例

2. 1 外国における例

地震の発生がみられた貯水ダムの例を表1に示した。それらはアジア、ヨーロッパ、アフリカ、オーストラリア、ニュージーランド、アメリカ等各地にわたっている。これらの貯水ダムの状況、地震活動その他は表1よりわかるが、それらを総合すると

(1) ダムの高さの範囲と個数

| 高さ63〜260m | 100m 以下 | 数 |
|-----------|----------|----|
| | 100m 以下 | 6 |
| | 100〜150m | 14 |
| | 150〜200m | 5 |
| | 200m 以上 | 5 |

(2) 貯水量の範囲と個数

| 貯水量 $5 \times 10^6 \text{ m}^3 \sim 37,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ | $\times 10^6 \text{ m}^3$ | 数 |
|--|---------------------------|---|
| | 100 以下 | 6 |
| | 100〜500 | 5 |
| | 500〜1,000 | 2 |
| | 1,000〜5,000 | 8 |
| | 5,000〜10,000 | 2 |
| | 10,000 以上 | 6 |

(3) 地震発生の時期

ダムが完成し、貯水開始が行われた直後、またはダムの完成前に貯水が始められた場合においても、その貯水量が増加するにつれて地震活動が次第に大きくなった場合が多い。そして貯水量の増減、すなわち人造湖の水位の変動に従って地震活動が盛んになったり衰えたり変動しているのがみられる。このように貯水に関連して起こる地震活動の多くは、貯水開始後数ヶ月以内に起こる場合が多いが、時には2〜3年ないし7〜8年後という長年月後に起こる場合もあり、しかもマグニチュードM5以上の被害地震が発生して被害を与えた場合もある。

貯水と地震活動との関係をみると次のようになっている。

(i) 地震活動がダム建設以前にはなく、貯水開始後に地震発生が多くなった例

Boulder ダム (Hoover ダム), Grandval ダム, Schlegeis ダム, 新豊江ダムなど。

Hoover ダムの場合はコロラド河に作られたが、前15年間地震活動があったという報告はなかった。1935年ダム建設が行われてから翌年9月に最初の地震が発生し、続いて1937年に約100個の地震が起こり、さらに1939年5月4日にM=5

の最大地震が発生した。このときの水位はほとんど最大に達していた。この状況を図1に示した。地震はBoulder市

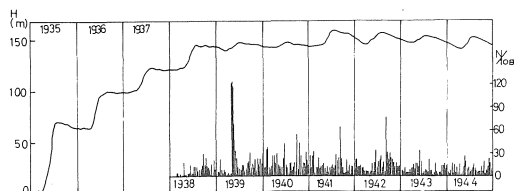


図1 Boulder ダム貯水池の水位と Boulder 市で観測した地震数との関係 (Carder による)

で記録された局地震である。1936年9月～1939年4月までは前震, 1939年5月4日に本震, それ以後余震活動が続いた。

Grandval ダム²⁾の場合は中央フランスのTruyere川に

表1 外国におけるダムの状態と地震の発生状況

| No. | ダム名 | 国名 | 完成年 | 高さ(m) | 貯水量 ×10 ³ m ³ | 種類 | 基礎地質 | 開始 | 地震 | 活動 | その他 |
|-----|----------------------------|----|----------|--------------|--|-----------------------|-----------------|------------------------------|--|------------------|-----|
| 1 | Marathon-Greece | | 1929 | 63 | 41 | 重力コンクリート | | 1931 | 1938 M=5 | 全地震は急な貯水で起こる。 | |
| 2 | Oued Fodda-Algeria | | 1932 | 100 | 225 | 〃 | ジュラ紀石灰岩 | 1933 | | ダム付近有誘地震続く | |
| 3 | Boulder (Hoover)-U. S. A. | | 1935 | (142) 221 | (35,000) 37,500 | 〃 | 花こう岩 変成岩 | 1936. 9 | 1939. 5. 4 M=5.0 | 地震活動続く | |
| 4 | Pieve di Cadore-Italy | | 1949 | 112 | 69 | アーチコンクリート | 硬質炭酸塩岩 | 1950 | 1964 | | |
| 5 | Kariba-Rhodesia/Zambia | | 1958. 12 | (125) 120 | (175,000) 160,000 | 〃 | 片麻岩・珪岩 | 1961 | 1963. 9. 23 | M=6.1 | |
| 6 | Grandval -France | | 1959 | 100 | 292 | 複合アーチ | 古生界 | 1962 | 1963 | 震度V (貯水池下) | |
| 7 | Camarillas-Spain | | 1960 | 44 | 40 | 重力コンクリート | ジュラ・白亜 紀系石灰岩 | 1961. 12 | 1961 | 地震活動なくなるまで水位減少 | |
| 8 | Canelles-Spain | | 1960 | 150 | 678 | アーチコンクリート | | 1962 | 1962. 6. 9 | 震度V | |
| 9 | Vajont-Italy | | 1961 | 260 | | 〃 | 石灰岩 | 1960 | 1963 | | |
| 10 | Monteynard-France | | 1962. 4 | (130) 155 | (275) 240 | アーチ | 〃 | 1963 | 1963. 4. 25 1966. 8. 24 M=5 M=4.3 | ダム付近の村にも被害 | |
| 11 | Koyna-India | | 1962 | (103) 104 | (2,780) 2,775 | 重力コンクリート | 玄武岩層 | 1963 | 1967. 12. 11 | M=6.5 | 〃 |
| 12 | Kremasta-Greece | | 1965. 7 | (147) 160 | 4,750 | ロックフィル | 第三系 | 1965 | 1966. 2. 5 | M=6.2 | |
| 13 | Piastra-Italy | | 1965 | 93 | 12.6 | 重力コンクリート | 片麻岩 | 1965 | 1966. 4. 7 | 震央ダム付近 震度Ⅵ-Ⅶ | |
| 14 | Contra-Switzerland | | 1965 | 230 | 86 | アーチ | 片麻岩 | 1965 | 1965 | 水をからにして貯水後地震なし | |
| 15 | Bajina Bašta-Yugoslavia | | 1966 | 89 | 340 | 中空洞重力 コンクリート | 三疊系 石灰岩 | 1967 | 1967 M=5 | | |
| 16 | Grančarevo-Yugoslavia | | 1967 | 123 | 1,280 | アーチコンクリート | 石灰岩、中生界 | 1968 | | 貯水により地震活動30倍 | |
| 17 | Kastraki-Greece | | 1968 | | | | | 1969 | | 地震活動あり | |
| 18 | Vouglans-France | | 1970 | 110 | 605 | アーチコンクリート | 石灰岩 | 1971 | 1971. 6. 21 | M=4.5 前震なし、余震20回 | |
| 19 | Hendrik Vermeerd-S. Africa | | 1972 | 66 | 5,000 | 〃 | | 1972 | | 微小地震活動あり | |
| 20 | 新豊江-中国 | | 1959. 9 | 105 | 11,500 | diamond-head buttress | 花こう岩 中生代 | 1959. 10 | 1962. 5. 19 | M=6.1 | |
| 21 | Ramganga-India | | 1974. 初 | 125 | 2,490 | アース ロックフィル | 新第三紀～ 第四紀砂岩 | 1974. 4月～9月の65日間にダムから20km以内で | 221地震あり | | |
| 22 | Mangla-W. Pakistan | | 1967 | 115 | (7,200) 6,360 | アースダム | 砂岩、粘土 鮮新・更新地 | 1968 | | 水位増加で活動盛 | |
| 23 | Vogorno-Switzerland | | 1964. 8 | 230 | 80 | | | 1965. 5 | | | |
| 24 | Oroville-California | | 1967 | 235 | (4,365) 4,400 | アースダム | 第四系 更新世 | 1975 | 1975. 8. 1 | M=5.7 | |
| 25 | Nourek Tadzik-U. S. S. R. | | 1972 | (300) 140 | (10,500) 11,000 | embankment | 古第三系一 第四系 | 1972. 12 | M=4～4.5 | | |
| 26 | Benmore-New Zealand | | 1964 | (110) 96 | 2,040 | アースダム | 二疊系 三疊系 | 1965 | 1966, 1971 | M=5.0 | |
| 27 | Keban-Turkey | | 1976? | 160 | 30,600 | embankment | 堆積岩・貫入岩 変成岩 | | | | |
| 28 | Schlegeis-Austria | | 1971 | 122 | 127.7 | アーチコンクリート | 片麻岩 | 1971. 10 | 1973. 4 | | |
| 29 | Talbingo-Australia | | 1971 | 176 | 920 | | | | M<3.5 | | |
| 30 | Eucumbene-Australia | | 1970 | 116 | 4,170 | | | | | | |
| 31 | Blowering-Australia | | 1970 | 113 | 1,718 | | | | | | |

作られたが、この地域は地震のないところであった。ダムが1959年に完成し、その年の9月に貯水が開始された。1962年末に若干の地震の発生があったが、1960年に貯水池の水位が最大に達している。1962年に貯水をからにし再び貯水されたが、1963年8月に貯水池の下に震源のある強震を記録した。震度V (MMスケール)を感じた地域は小さかったが、1964年にも2回起るなど、今まで地震的には静かであった地域に、貯水に関連して地震活動がみられた例として知られている。

Schlegeis ダムはオーストリア・アルプスでの最大人造湖におけるもので、1971年末に完成した。この地域の地震活動は観測結果ではきわめて低く、 $M < 0$ であり、このような低活動における自然状態での地震活動を推定することは困難とされていた。したがって貯水前の地震

活動はゼロ活動といえよう。よって自然地震と誘発地震とを区別することは可能である。Schlegeis 地震観測点における地震活動と貯水池の水位の変動との関係を図2に示したが、1971年9月以前には地震活動が観測され

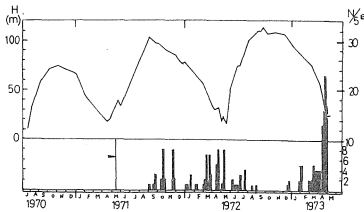


図2 Schlegeis ダム貯水池の水位と地震数との関係 (Blumによる)

ていない。それまでは水位が75mにまでしか達しなかったが、9月には初めて100mに達したのであった。

1971年10月以降は局地地震がめだって増加し、水位をさげてもなお活動がやまなかった。1972年3月から5月に至る水位の最低期間を通じても活動がみられた。1972年12月第2回目の100m水位を越えた時には、それまでやんでいた活動が始まり、1973年4月には水位の最低中にも前回以上に活動が盛んになったことが知られる。これは水位と地震活動とが強い相関をもち、その時間差が4～5カ月ある。Kremasta, Kastraki ダムの場合⁴⁾には、105～235日のタイムラグのあることが見出されている。またKoynaダムの場合には3～4カ月のタイムラグが示されている⁵⁾。

新豊江ダム⁶⁾の場合をみると、この地域はダム建設以前25年間に僅か4回の震度V～V1 (MMスケール)の有感地震が発生したのみで、地震活動の低いところであった。1959年10月貯水開始後の1カ月においてダムから西南約160kmにある広東地震観測所の地震計が貯水池付近の地震活動を記録し始めた。そして貯水池の水位が急激に上昇するにつれて地震回数が多くなった。1960年10月には観測所はダムの付近に2万倍の3成分地震計を設置し、1961年7月以後地震観測網を作って観測したところ1972年12月までに $M \geq 0.2$ の地震を258,247回記録した。そのうち23,513回は $M \geq 1.0$ の地震であり、震源の深さが4～11kmくらいで、発生場所が貯水池付近に広がっていた。図3には1カ月の地震回数、水位、地震エネルギーの放出などの経年変化を示した。1962年3月19日にダムの北東1.1kmで $M=6.1$ の地震が発生し、ダムの頂上に長さ82mの水平の亀裂ができ、108mの高さ左右両側にも若干の亀裂ができた。そして震度Ⅷの地域が28km²に達した。この中地震の前20日間は地震活動は徐々に減じ

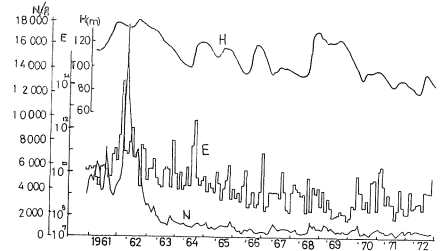


図3 新豊江ダム貯水池の水位(H)、地震回数(N)、地震エネルギー(E)の経年変化 (Shen Chung-kangらによる)

$M \geq 3.0$ 以上の地震が起こらなかった。本震の震央に近接して微小地震がダム近くで起こり東北東方向に分布したが、本震の7時間前にはこの地域全体が $M \geq 0.6$ 以上の静かさとなった。このように本震の前に多数の前震が発生し、さらに本震の後に余震が発生しているが、前震、余震の活動指数 b ($\log N = a - bM$ における)の値がそれぞれ1.12, 1.04となっている。これらの値と同じような地震活動のみられた他のダムにおける値とを比較するため表2に示した。

表2 貯水に関連のある地震の前震、本震、余震の b 値⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

| 貯水ダム名 | 前震 b | 余震 b | 地震一般地震 b | 本震 M_0 | 最大余震 M_1 | M_1/M_0 | 減衰係数 P |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------|-------------|
| Kremasta | 1.41 1.07 ⁽⁶⁾ | 1.12 0.91 ⁽⁶⁾ | 0.82 | 6.2 | 5.5 | 0.89 | 0.78 |
| Kariba | 1.13 1.07 ⁽⁷⁾ | 1.03 1.28 ⁽⁷⁾ | 0.84 | 6.1 | 6.0 | 0.98 | 1.0 |
| Koyna | 1.13 1.07 | 1.03 1.28 | 0.47 | 6.5 | 5.2 | 0.80 | 1.6 |
| 新豊江 | 1.12 | 1.04 | 0.72 | 6.1 | 5.3 | 0.87 | 0.9 |
| Oroville | 0.37 | 0.61 | 0.78 | 5.7 | 5.1 | 0.89 | 0.70 |
| Monteynard | | 0.72 | | 5.0 | 4.5 | 0.90 | |
| Boulder | | 1.40 | | 5.0 | 4.4 | 0.88 | |
| Manjla | | 0.96 | | 3.5 | 3.3 | 0.94 | |

表2からわかるように貯水に関連した地震の前震、余震の活動指数 b 値はその地域の一般地震の b 値に比べて大きい場合が多いが、Oroville ダムによる場合のように一般地域地震の b 値より小さい場合もある。なお貯水に関連して起こる地震の最大余震は本震の約0.9くらいである場合が多い。

Karibaダムの場合は²⁾、この地域の基盤がしゅう曲しており、多くの断層もみられるが、地震的には静かで、地震活動がみられない地域と考えられている。このダムでは1958年に貯水が行われているが、ダムの完成は1959年であり、1959年から3カ所に地震観測所が設けられて地震観測が行われた。さらに3台の地震計が設置されて1961～1963年の地震をとらえている。1961年にまず有感地震があり、地震活動が貯水の進行とともに急速に盛んになった。そして1963年8月から11月にかけて $M 5.1 \sim 6.1$ の地震9個が発生したが、この地震活動の最盛期は人造湖の貯水の完成直後に来ている。震央は人造湖の最深

部近くにみられており、地震活動の増加は湖の水位増加に従っている。この地震活動の開始は貯水により誘発されたが、前震、本震、余震のパターンを示し、その後年月の経過とともに地震活動が減じている。

(ii) 地域的地震活動がダム建設以前にもあったが、貯水の水位上昇に関連して貯水ダム付近で地震活動が活発になった例

Marathon, Koyna, Kremasta, Grančarevo, Benmore, Nourek Tadzik, Kariba 等のダム

Koyna ダム貯水池のあるところは、厚い玄武岩層に凝灰角礫岩および膠灰粘土をはさんだ基盤であり、その下に先カンブリア紀の岩盤がある。この地域は地震のないところとされているが、前世紀にのみ局地地震があったことが知られているし、インド島の西部周縁部は地震活動がみられているので、全くの無地震地帯ではないといえよう。ダムの完成後1962年貯水が開始され、貯水量が30%になった2～3月後の1963年に小地震が貯水池付近で記録され、ある地震には音響を伴っている。1964年には貯水池付近に3地震観測点を設置したところ、ダムや貯水池近くに震央のある浅い地震 $M=2\sim3$ 程度のものが154個記録された。これらは前震に属しているが、人造湖は1965年最大水位を示し、経年変化を示すに及び1967年9月に地震活動が盛んとなって、9月13日 $M5\sim5.5$ の地震が発生した。最大地震は1967年10月10日の $M6.5$ で、ダム構造物の数箇所へ亀裂を生じ、被害をもたらしたが、Koyna Nagar 村付近で死者も出たほどであった。

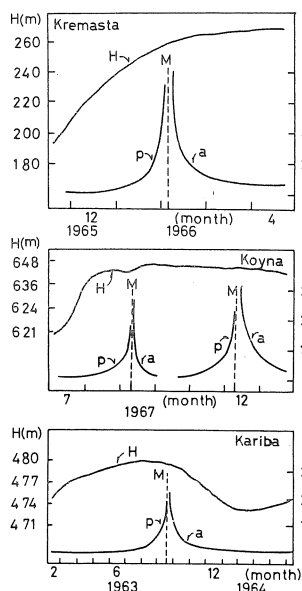


図4 Koyna, Kremasta, Kariba等のダムにおける前震(p) 主震(M)・余震(a)活動と水位(H) (Papazachosによる)

これら二つの地震の前震余震の活動を示したのが図4である。なおこれら二つの地震が発生するまでの地震活

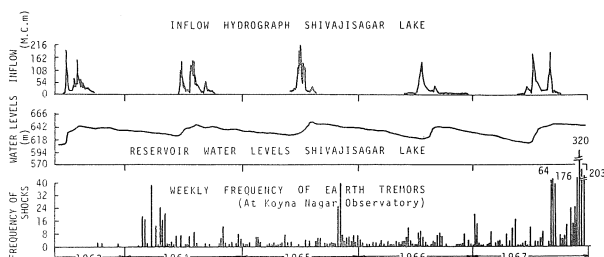


図5 Koyna ダムにおける水位、地震回数の経年変化 (Guha らによる)

動は図5に示した¹⁰⁾。この地震活動はこの地域の構造地震とは著しくちがうといわれ b 値が大きく、貯水に伴い発生したと考えられているが、水位の変動と地震の変動パターンとは必ずしも一致しない点もある。地震発生メカニズムについて、水圧変化が地下深度の水圧の最大値に大きな変化を与えるかどうか、また 10km/cm^2 程度の間隙水圧の増加が地下深所の岩石の強度に地震発生に必要な大きな変化を起こすであろうかという疑問も持たれている。

Kremasta ダムの場合¹¹⁾は1965年に完成後貯水が開始されたが、急激な人造湖の水位の上昇が行われ、それに伴って地震活動が発生した。地震活動は主として人造湖の北部域にみられている。以上の関係は図6からわかる

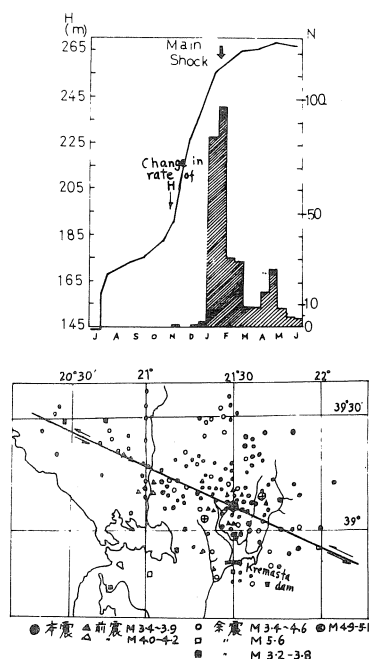


図6 Kremasta ダムにおける水位変化と地震発生 (Rothe による)

であろう。前震・余震活動にあける b 値は表2に示すように、それぞれ1.41, 1.12となっている。3カ月毎の地震数と3カ月平均水位との関係を示すと図7のよう

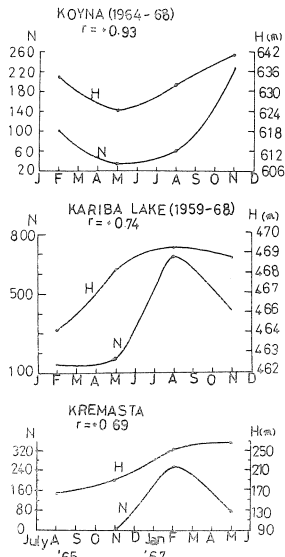


図7 Koyna, Kariba, Kremasta等のダムにおける3カ月平均の水位と地震数との関係 (Gupta らによる)

になる。図7にはKoynaダム, Karibaダムの場合をも示した。Koynaダムにおける場合は地震数と水位との相関は最もよいが、Kremastaの場合はKaribaダムの場合よりも劣っている。

Marathonダムの場合は自然の地震活動は高く、貯水池の水位変化との関係を見るのがやや困難であるが、ほとんどの地震が水位の急激な上昇時のみに起こっている。

Grančarevoダムの場合には基盤である中生代石灰岩には断層や節理があり、全地域はかなり変動を受けている。貯水前には半径75kmの地域に447個の地震が2年半の間に観測されたが、水を貯めたりなくしたりすることを3回繰返したとき、4,676回の地震が観測され、そのうち81%の3,694が半径5km以内のもので、Mが1~2の微小地震が主体である。半径20km以内が貯水量の影響によるものであると考えるならば、このことは地震活動が30倍にもなり、貯水の影響によって微小地震の活動が誘発されたと考えられている。

Benmoreダムの場合は貯水の影響として地震活動が貯水前に比して3.1~6.5倍多いことが指摘されている。

それは表3から知ることができる。

Nourekダムの場合は、この地域の地震活動は貯水開

表3 Benmoreダム近くにおける貯水前後の地震数

| 面積の半径 (km) | 地震と規模 | 地震数 | | 活動比 後/前 | 有意性 (%) |
|---------------|---------|----------|----------|------------|------------|
| | | 貯水前 2.5年 | 貯水後 5.8年 | | |
| 80 | 全数 | 4 | 29 | 3.1 | 98 |
| | M 4.0以上 | 1 | 13 | 5.6 | 93 |
| 60 | 全数 | 2 | 21 | 4.3 | 98 |
| | M 4.0以上 | 1 | 10 | 4.3 | 90 |
| 40 | 全数 | 1 | 15 | 6.5 | 97 |
| | M 4.0以上 | 0 | 6 | — | 92 |

始以前にもあったが、貯水の第1階段として1972年12月までに貯水池の水位が100mまで上げられた。貯水中に地震活動が多くなり、貯水池やダム近傍に地震発生がみられるようになった。貯水池から5km半径内における微小地震数は通常の場合の10倍に増加した。貯水前には10日間に局地地震が3~4回あったが、貯水後は30~40回に増加した。しかもこれら地震の震源の深さは5km以内である。微小地震の発震機構はまだわからないが、応力軸は過去におけるものの方位と比べると変わっていることが知られた。

貯水量の重さは破碎帯岩石の間隙圧を変え、それが貯水池付近の硬い岩石中の応力分布にも影響し、ある深さある範囲まで構造的破碎域をもたらし得るであろう。貯水池の水は地下水と水力学的に関連しており、貯水中には破碎帯域の地下水は数kmの範囲にわたって弾性歪を受けるであろうが、そのひずみは1km当り数日にわたって広がると思われる。したがって破碎帯域および付近の岩石内の圧力がちがうようになり、この不等圧は破碎域の有効水圧を減ずるようになる。すなわちせん断抵抗を減じ、構造的変位を来たす結果、地震を起こし、応力軸方位の再分布が起こると考えられている。

(iii) ダム建設前の地震活動は不明であるが、貯水によって地震活動が誘発されたと思われる例

Oued Fodda, Pieve di Cadore, Canelles, Vajont, Piastra, Monteynard等のダム

Oued Foddaダムの場合は²⁾、ダムはジュラ紀に属する石灰岩基盤に作られているが、割れ目がありダムサイトで背斜構造をなしている。貯水前の地震活動の資料は不明であるが、1932年末に貯水開始したところ1933年に多くの地震が発生した。これらの地震はダムの付近にのみ発生し5月末まで続いた。この解釈の一つにはダムでの背斜の下に無水核があり、それが貯水池から水を浸透させて膨張し、地震を起こす結果となったという解釈であるが、詳細は不明である。

Pieve di Cadore ダムの場合²⁾は1949年に貯水開始、その後1950年に地震活動が増加したが、微小地震が何年間も続き、1964年に若干大きな地震が起こっている。ダム基盤は硬質炭酸塩岩で多くの断層があったので、地震発生を容易にしたのであろう。

Canelles ダムの場合²⁾にはダム完成後約2年後に震度Vの地震が発生している。震度分布をみると人造湖付近の震度は大きくなっている。

Vajontダムの場合は、この地域は構造的にもめており、地震学的には活動性が考えられるところであって、1933年に注目に値する地震が貯水池の近傍に起こっている。1961年にダムは完成したが、その前年に貯水が始まり、貯水池の水位が最大になったとき地震が現われた。1962年に同様なことを繰返して地震が増加し、震度も大きくなった。1963年に活動が最も多くなった。これらの関係を図8に示したが、これより水位の変化と地震活動との関係がわかるであろう。

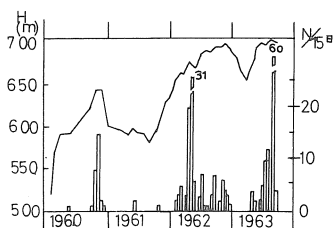


図8 Vajont ダムにおける水位変化と地震数との関係(Bozovic による)

Piastra ダムの場合²⁾は、地震活動が貯水により誘導された例の一つで、1965年貯水完成后同じ年に地響や多数の地震が発生し、1966年4月7日に震度Ⅳ～Ⅶの本震が発生した。地震群の震央はダムから5kmくらいの小範囲に分布し、1966年10月まで続いて減少した。

Monteynard ダムの場合^{2),11)}は、ダムサイドの基盤は断層や節理の多い石灰岩から成っているが、硬質で力学的にも適合したものである。ダムは1962年に完成し、1963年4月までに貯水池の水位は最大を示した。4月末に僅か2～3の前震があっただけで、M5の本震が起こった。ダム付近は震度Ⅶ～Ⅷで、震央はダムサイトそのもののところで震源は浅かった。若干の被害や不安が付近の村にも起こったが、1966年にも別の地震群が起こり、その最大はM4.3であった。震度Vはダムサイトを中心に約10kmの範囲にみられている。

(iv) 貯水池の水位を下げた場合地震がなくなった例

Camarillas ダム, Contra ダムなど

Camarillas ダムの場合²⁾は、1960年に貯水開始され、

1961年水位が最大の3分の2に達したとき、地響や多数の地震が発生した。その地震活動は1961年12月に最高に達したが、水位をだんだん下げた結果、遂に1962年末までに地震活動がなくなってしまった。この原因はこのダムの場合には、Oued Fodda ダムの場合と同様にダムが作られている基盤下のドーム構造に帰因している可能性のあることが指摘されている。

Contra ダムの場合²⁾は、高さは230mもあり、世界でも最高のクラスに属している。基盤は片麻岩であり力学的にも適合性はあるが、しゅう曲がみられ断層が発達している。ダムサイトに一つの断層があるがよい状態に復している。二つの大きな断層はダムの上流の谷を通っている。1965年にダムは完成したが、貯水は1964年に開始した。水位の上昇に従い地震活動が始まり、数百の局地震や地響も発生した。1965年10～11月に最大地震が最大水位に達したときに発生した。貯水をからにし1966年中に再貯水したが、地震活動がみられず、貯水開始前のレベルに下がってしまった。このような例は他にはない。

(v) ダムにおける貯水後地震が半径20km以内に起こったが、貯水との関係がはっきりしない例

Ramganga ダム, Oroville ダムなど

Ramganga ダムの場合¹⁴⁾は、ダムは1974年初めに完成され、1974年夏中に貯水された。1974年4月～9月の65日間に221個の地震がダムサイトから20km以内で記録されたが、貯水時の水位との関係は明瞭でないという。この地域はヒマラヤの主要周縁断層帯に位置しているので、主要地震の発生の可能性はあるが、過去には起きていない。

Oroville ダムの場合¹⁵⁾は、1967年の後半に貯水が行われたが、注意すべき地震活動の増加は半径30km以内にはみられなかった。約8年後の1975年6月に小さな地震活動が始まり、8月1日M=5.7の本震がダムの南南西11kmに発生した。この地震でダムは被害を受けなかったが、震央の北北西7kmにあるOroville市にもかなりの被害を生じた。この地震の原因について人造湖との関係を見るため、人造湖の重さによって付近の岩石圏に導入された応力、水の重量から誘導された、震源域における断層面でのせん断応力および最大垂直変形などから考察されたが、これらはいずれも震源域における発震メカニズムを解明するには至っていない。本震の発震機構から推定された断層面での応力の値は計算値とあわない。なお断層面¹⁶⁾は走向N3°E、傾きは西へ60°、深さ10kmになっている。8月中の余震はこの面上で336個発生している。ここで考えられていることは、今回の地震活動は貯水量の存在

には関係なしに、この地方の自然地震活動の一部であって、断層におけるせん断強度の減少が引きがねとなって発生したとしている。これは断層における液体圧が増加した場合に法線有効応力が減ずるため、地震発生が可能となると考えているので、人造湖との関係ははっきりしないというが、断層における液体圧の変化を通して人造湖との関係を示しているともいえる。

前述のように人造湖によって誘導されたと思われる地震活動にも、Hoover, Kariba, Koyna, Kremasta, 新豊江等のダムの場合のように、前震一本震一余震というパターンを明らかに示すものと、Voughlans ダムのように前震活動のみられないものもある。また多くの場合には、群発地震的地震活動を示すだけで、特に本震と思われるほどの大きな地震はない。

2.2 わが国における例

わが国においては、現在までに、ダム建設により地震活動が活発になって前述のような本震が発生し、その前後に前震・余震が起こった例がない。まして貯水によって起きた地震でダムに被害を与えた地震の例はまだない。

高さが 100m 以上、貯水量が 1 億トンを越すダムは 20 以上あるが、その大部分はわが国の 4 大電源地帯である北関東、中部、南近畿、南九州に作られている。これらの貯水ダムにおける地震発生状況は 1961～1971 年の 10 年間にわたって調べられたのがある¹⁷⁾。地震発生は貯水池のまわり半径 20km の範囲を対象としている。貯水池の規模からみてこの円以外の地域までは影響しないであろうということである。地震の発生が対象となったダムの例として次のものがある。

黒部、御母衣、九頭龍、奈川渡、一ツ瀬、高根、有峰、牧尾等の各ダム

黒部ダムの場合は、1960 年 10 月に貯水が開始され、5 年間で水深 150m まで水位をあげ、その後 4 年間は水位の昇降を繰返しながらゆっくりと最高水深 180m にされ

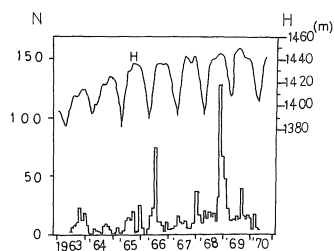


図9 黒部ダムにおける地震回数と水位レベルの変化(萩原・大竹による)

た。水位の変動に伴う微小地震活動の観測¹⁹⁾が現地で行われたが、それを示したのが図9である。微小地震の発生は水位とよい相関を示し水位が上ると地震発生回数が増していることがわかるが、1961年8月19日のM = 4.9および1968年9月16日のM = 3.7の地震の初動分布は中部地方におきた一般地震と同じであることが確かめられている。なお1961～1968年までの地震を示したのが図10である。

奈川渡ダムの場合は¹⁷⁾、1969年3月貯水開始、8月に満水となっている。それ以後にダムから20kmの範囲に7回の地震が起こっているが、満水に達した時期に貯水池北方約10kmの地域でM = 4.7～5.0の地震が起こっている。これらの地震の大部分はきわめて震源は浅く0～10kmの深さとなっている。1970年3月～1973年3月の間微小地震の観測が大竹政和氏によって行われているが、前記の地震活動地域に活動のはげしいところがみられ、貯水池直下部には微小地震の発生は微弱であったという。

| 年月 | 日 | 震 性 | 北 緯 | 東 経 | H (m) | M |
|-----|------|-----|---------|--------|-------|-----|
| G-1 | 1961 | 819 | 137°39' | 36°30' | 0 | 4.9 |
| 2 | '61 | 821 | 41 | 30 | 2.0 | 4.0 |
| 7 | '63 | 29 | 37 | 27 | | |
| 10 | '63 | 31 | 45 | 26 | 2.0 | |
| 15 | '63 | 34 | 39 | 25 | 0 | |
| 20 | '63 | 12 | 34 | 25 | 0 | |
| 33 | '68 | 9 | 42 | 24 | 0 | 3.7 |
| 34 | '68 | 10 | 50 | 29 | 1.0 | 4.0 |
| 35 | '68 | 11 | 33 | 30 | 0 | 4.1 |
| 36 | '68 | 11 | 39 | 31 | 1.0 | 3.8 |
| 37 | '68 | 12 | 44 | 32 | 0 | 3.9 |

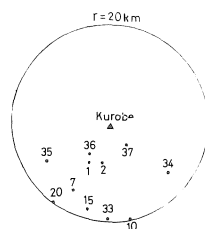


図10 黒部ダム付近の地震活動(岡本による)

御母衣ダムの場合は、満水後半にしてダムから20km離れた距離に1961年の北美濃地震M 7.0が発生しているが、この地震が貯水と関連して起こったかどうかを判定するには資料が不足であろう。ただ付近に破砕帯などがある場合には、貯水などによって局所的に間隙水圧の変化を来し、ひずみの変化が起こる可能性があるため、地震が発生する場合もあるであろう。これについては後述する。

九頭龍ダムの場合は、1967年5月貯水が開始され1968年3月満水となっているが、満水時に北方20km弱の所にM = 3.7の地震が発生している。有峰ダムの場合は、黒部ダムと約20kmくらいの距離にあるため、どちらの影響

響が現われたのかかわからないが、ダムから半径20km以内に1961年から1968年までに地震が7回ほど起こっている。高根ダムの場合も、奈川渡ダムと20kmくらいの距離にあるので、どちらの影響か不明であるが、7回ほど半径20

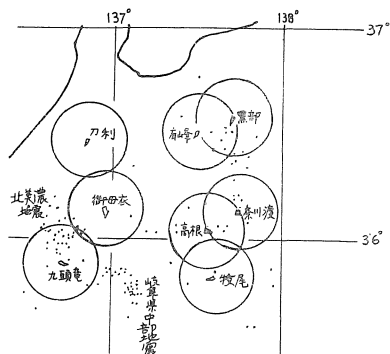


図11 黒部、奈川渡、御母衣等のダム付近の地震活動（岡本による）

km以内の距離に地震の発生がみられている。これらを図11に示した。一ツ瀬ダムの場合は1963年の満水後には1964年1回、1966年2回の地震が半径20km以内に発生している。

牧尾ダムの場合、1961年5月の完成であるが、1961年3月に貯水が開始され、満水は1962年7月である。ダム周縁における地震活動を図12に示したが、半径20km以内では貯水前には2回、貯水開始後1回、満水後6回あるが、王滝付近の1963年、1973年以外の地震はあまり関係がなさそうである。また三岳村付近に1967年に2回、1968年に5回、1969年に7回、1972年に1回、1974年に

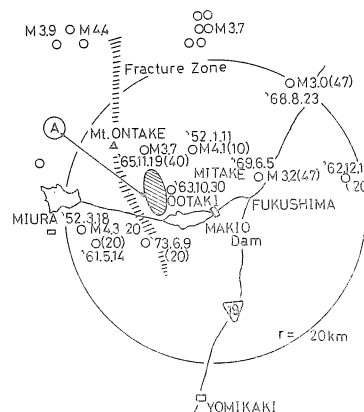


図12 牧尾ダム付近の地震活動（群発地震の震央域は牧尾、三浦、読書3点観測により名大により求められた）

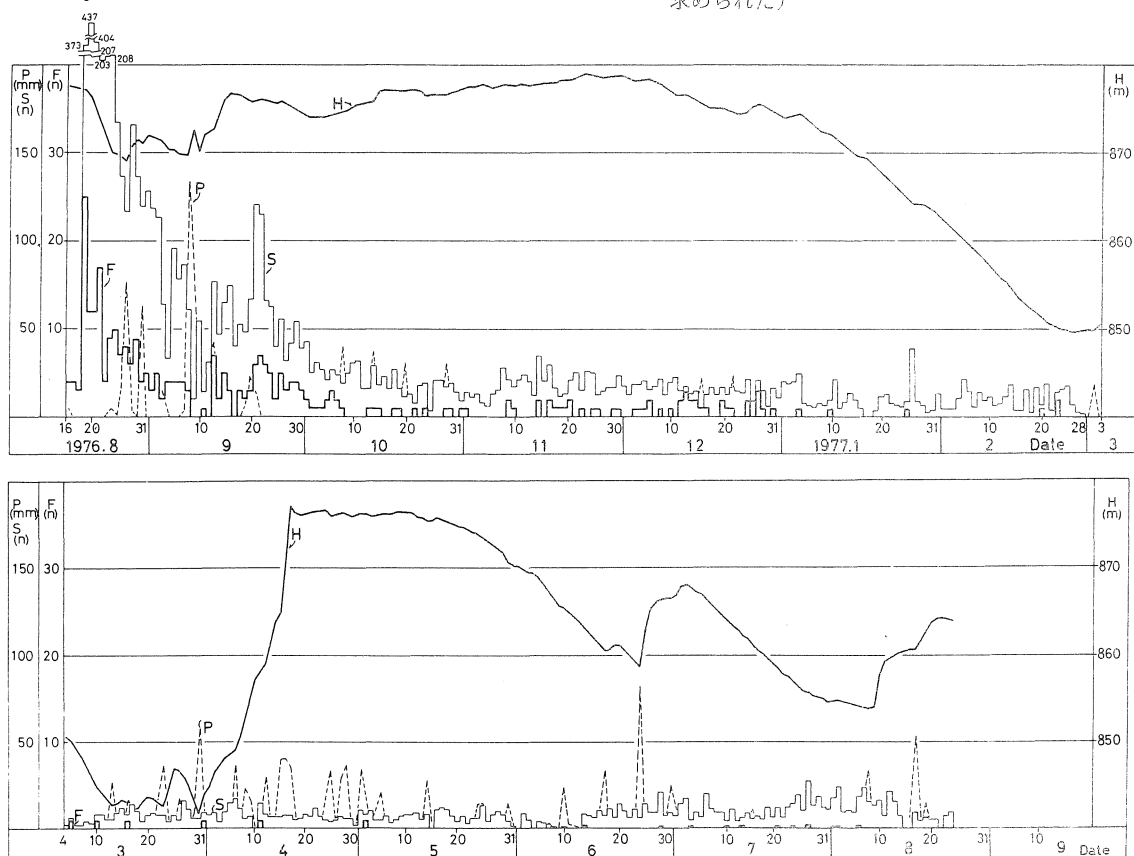


図13 牧尾ダムにおける水位変化と地震活動（牧尾ダム観測による）

H：水位，F：有感地震，P：雨量，S：地震計記録地震回数

1回の地震が発生している。これらの地震はダムの貯水と関係しているかどうかわからない。

1976年8月13日以来牧尾ダムの北北西、王滝村西部に地震群が発生した。8月16日から1977年8月まで牧尾ダムで観測された水位変化、地震活動（有感回数、地震計記録）、雨量などの時間的変化を図13に示した。8月19日には有感回数が最大の25回を数えた。水位・レベルが877.75mに達していたのが、8月27日には876.89mまで下げられた。地震回数は8月19日以後水位の減少とともに減じ、9月9日には有感地震がなくなった。そのときの水位・レベルは877.26mであった。その後水位が再び上昇するに及び地震回数が多くなり、有感地震6～7回を数え、9月16日には877.67mに至ってM 3.5の地震が発生している。9月21日にはM 3.7の最大地震が発生して地震活動がやや活発となったが、10月になって水位レベルが877.4m程度となるに及んで、有感地震が2～3回程度になった。その後若干の活動があったが、微小地震だけが多くなり、1977年1月以降、水位レベルが877.0mから875.0m程度となるに及んで有感地震は稀にしか起こらなくなった。4月以降の水位レベルが、877.6～877.7mに上昇した場合においても地震活動は4月以前の低水位のときとあまり変わっていない。このような地震活動が1年余続いているが、これがダムの貯水と関係しているようにもみえるところもあり、水位変化にあまり関係のないところもあって結論には達していない。しかし御岳近傍に破砕帯があり、貯水池にも近いので、あるいは水が群発地震の引きがねになったのかも知れない。この付近の地震観測が継続して行われることが切望される。いずれにしてもダム完成後の15年後の出来事であり、前述の貯水による地震活動とは態様を異にしているともいえる。

以上示したダムの状態を表4に示した。

表4 ダムの高さや貯水量

| No. | ダム名(水系)完成年 | 高さ m | 貯水量 $\times 10^5 \text{ m}^3$ | 貯水開始 | 基 盤 |
|-----|----------------|---------|----------------------------------|-------------|-------------------|
| 1 | 御母衣(日田川) 1960 | 131 | 370 | 1960. 11. 3 | 石英斑岩、火成岩 |
| 2 | 牧 尾(王滝川) 1961 | 105 | 75 | 1961. 3. 26 | 粘板岩、砂岩、チャート層状岩中生成 |
| 3 | 一ツ瀬(一ツ瀬川) 1963 | 130 | 261 | 1964. 4. 2 | 砂岩、粘板岩 |
| 4 | 黒 部(黒部川) 1964 | 186 | 199 | 1960. 10 | 花崗岩、火成岩 |
| 5 | 九頭竜(九頭竜川) 1968 | 128 | 320 | 1967. 12. 2 | 砂岩、粘板岩、輝緑凝灰岩、古生代 |
| 6 | 奈川渡(伊川) 1969 | 155 | 123 | 1963. 3 | ホルンfels、花こう岩、火成岩 |
| 7 | 高 根(東御川) 1969 | 133 | 45.8 | 1968. 2 | チャート 火成岩 |
| 8 | 有 峰(和歌山川) 1961 | 140 | 218 | 1959. 4. 15 | 輝岩、砂岩、頁岩、古生代 |

表4にあるダムの一ツ瀬ダム(宮崎県)を除く他は中部地区にあるもので、基盤は有峰、九頭龍は古生代堆積岩、御母衣、黒部、高根、奈川渡は火成岩、牧尾は中

生代堆積岩からなっている。類似の基盤をもつダム貯水池においても、地震の発生がみられるものと、みられないものがある。わが国の多いダムのうち地震発生と関係の疑いがもたれる前述ダムの多くは変成岩帯とその周辺部に造成されているといえよう。

3. 貯水による地震の問題について

貯水と地震の発生については第2章においてその例を中心に述べたが、それらをここで総合して考察してみようと思う。

(1)明らかに貯水と関連して地震が起こっていると思われる場合はあるが、その地域の自然に起こる地震とはっきり区別しがたいものもある。

(2)貯水と関連して起こる地震は比較的浅く数km程度であり、貯水の水位変動に対応して変化する場合が多い。貯水地付近または10km以上離れたところにも発生がみられる。

(3)貯水誘導型地震は微小地震の群発的傾向を示すものが多いが、前震、本震、余震という一般地震にみられる系体と類似である。その場合、地震活動指数b値がかなり大きいものが多い。本震はM 6程度のものが最大となっている。

(4)貯水誘導型地震の発生には基盤の地質・構造的条件と物性条件の差異が支配的であると思われる。貯水直後に地震発生があるものや、2～3年ないしそれ以上経過してから地震の発生がみられる場合もあるが、これらは基盤の貯水による応答の差異によるものであろう。特に短時間貯水は地震発生の危険性の大きいことを示している。

(5)降雨後に断層付近で地震が起こりやすくなることは三河地殻変動観測所山内常生氏の研究、京都大学防災研究所尾池和夫氏の山崎断層の研究などで知られているが岩石の割れ目に水が浸入すると滑りやすくなる結果、地震の発生を容易にしうるのであろう。これが結局地震の引きがね的役割となるものと思われる。地震がおきない場合は条件が整わないためであろう。

(6)貯水量による重量の増加、間隙水圧の変化なども地震を起こりやすくするのであろう。

地震有効応力 $\sigma =$ 構造応力 σ_0 - 摩擦応力 σ'

がよく考えられているが、 $\sigma_0(t) \geq \sigma'$ の場合 $\sigma_0(t)$ が $\delta\sigma_0$ だけ増加するか σ' が $\delta\sigma'$ だけ減少しても地震の発生は早くなる。ただ後者の場合には地震数が増加し、地震の大きさは小さくなる。現象はこのような簡単なものではなく、種々の影響によって複雑な時間的変化を $\sigma_0(t)$ が示すであろう。貯水量が $\sigma_0(t)$ を増す場合、存在

する断層面の傾きが問題である。断層面が水平ならば法線応力 N の増加となり、($\sigma' = Nf$ で f が摩擦係数)地震発生を防げよう。断層面が傾く場合は貯水量は σ_0 、 N に影響するが、その影響は σ_0 を大きく、 N を小さくするむきに効くであろうから地震発生を可能にするであろう。

(7)高さと貯水量との関係を見るに(図14参照)高さ100m以上、貯水量 $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上に地震発生例が多いが、これ以下でも地震発生がみられているので高さや貯水量だけが主要な要素ではないようである。

4. 水と関連した地震の例

(1) デンバー地震²⁰⁾(1962~1971)

アメリカ・デンバーでは1962年工場の廃液を3,671mの深井戸に圧入したところ、注入開始後数週間たって井戸付近に小地震が発生した。注入をやめると地震回数は減少し、注入が再開されると地震回数は増加した。1967年 $M = 5.0 \sim 5.2$ の被害のでる地震3回が発生した。注水は 1.7×10^4 トン/月の割合で1966年2月20日頃まで続き、地震は1971年頃まで続いた。震源は井戸を中心に北西-南東方向にのびる $8 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ の範囲に集中し、深さ

は4.5~5.5kmであった。

(2) 松代地震

1965~1967年長野県松代町を中心に群発地震が発生し最盛期には1日600回余の有感地震があり被害を伴った地震が50回にも達した。第1活動期は1965年10月~1966年2月、第2活動期は1966年3月~7月、第3活動期は1966年8月~12月、第4活動期は1967年1月以降と区分されるが、第3活動期に地すべり・湧水現象が現われた。地下水の湧出が約10,00万トンに達したが、この水が火山爆発のときのマグマのような役割を果たしたとも考えられる。

1970年1~2月注入実験が行われ、水道水が2回にわたって1800m深井に約2,880トン、14~50barの圧力で注入された。圧入された水の一部は既存の断層に沿って広がり、注入地点の北方で注入後5~10日で $M 2.8$ の有感地震を含め一連の微小地震が約200回も発生したという。²²⁾

(3) Rangely 地震²¹⁾(1969~1973)

アメリカ・コロラド州西部のRangely 油田において、深さ約2,000m深井に注入および排水実験が行われたが注入圧力が250barを越えると地震が発生し始めたという。

(4) 北コーカサス地震²³⁾

割れ目の多い上部白亜紀石灰岩層においての開発が行われ、500万トンの油が採取されたが、100気圧の地層圧が減少したため地震活動がみられたという。

(5) 西部ニューヨーク州地震²⁴⁾

この地域Attica-Daleは今世紀に数回の被害地震のあった所であるが、現在地震活動が1年間では1ヵ月1回以下の低活動域である。ところが1971年に、120気圧で水を注入するに及んでサイトに地震活動の明瞭な増加がみられた。ここは100kmにわたる断層の延長の近くにあったためか1日80回ほど微小地震が起こった。局所的には有感もあり、最大は $M 2.7$ で注入井の底の付近に震央があった。地震活動が起こる最底の水圧堀りの圧力は41~48気圧であることがわかった。1971年に用いた井戸は430mの深さでClarendon-Linden断層から50m離れたところにあったので、高圧下の水はその断層に達し地震の引きがねとなったようである。水の広がりは注水と地震発生の時間空間的關係から求めるとDenver, Rangely, 松代, Daleなどでは約 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2 / \text{sec}$ で地震の前兆異常から求められた値に類似であるという。

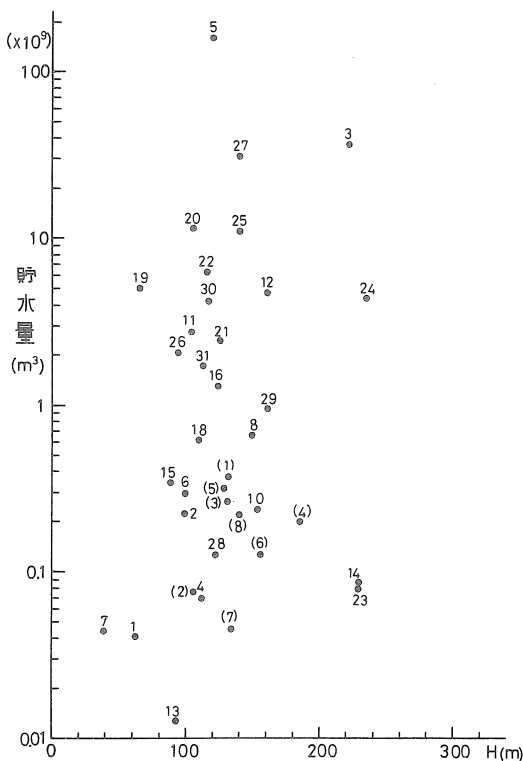


図14 地震を発生したダムの高さと貯水量との関係
他の番号は表1の番号を示す。

()中の番号は表4の日本のダムの番号

(6) その他

1930年北伊豆地震の発生前の丹那トンネル内で水の湧水がきわめて多く、西口坑内だけでも6年間に約 2.2×10^8 トンが湧水しているので、全体としてはさらに多いであろう。このような大量の水の排出は周辺の応力場の均衡に変動を与え地震を誘発する可能性も考えられるので、地震発生の疑いも持たれるのである。

1961年の長岡付近の地震は $M = 5.2$ であって死者5人全半壊家屋685戸を出す被害地震であるが、この地震の発生前に付近で天然ガスの掘さくが行われたというからそれによる引きがねが地震発生を可能にした疑いもある。

地震の際には地下水圧が変化し、湧水量の多くなる現象は犬山地殻変動観測所で観測されている。湧水量の最大になる時間および水量は地震発生場所によってちがう。震央距離50kmくらいで坑内湧水量の変化は約20cc/sec、その最大になる時間は地震後3時間くらいになっている。1200kmも離れたところに起こった $M 7.8$ の地震の場合でも数%sec程度の湧水量の変化がみられている。

5. おわりに

貯水ダムと地震の問題について以上その例より考察した。外国ではかなり明瞭に地震発生が貯水と関連して起こっている例は多いが、わが国ではまだその例は少ない。貯水が地震頻度に影響を与える要因には

- (1) その土地の地質と地盤構造、岩盤の物性
- (2) 水量の増加の割合と貯水時間
- (3) 高水位の維持される時間
- (4) 最大水位

などがあげられよう。

地震発生のある場合とない場合を十分に研究することは重要である。そのためには地表下における岩盤の性状や地震活動をよく調べる事が十分なされなければならない。ダムの建設は岩盤の性状に適したものが行われることが重要であり、地震観測網の整備活用なども問題解明のために望まれるところである。

参 考 文 献

- 1) Carder, D. S. (1945) : Seismic Investigations in the Boulder Dam Area, 1940—1944, and the Influence of Reservoir Loading on Local Earthquake Activity., Bull. Seism. Soc. Amer., 35, 175—192.
- 2) Božović, A. (1974) : Review and Appraisal of Case Histories Related to Seismic Effects of Reservoir Impounding., Eng. Geology, 8, 9—27.
- 3) Blum, R. and Fuchs, K. (1974) : Observation of Low-Magnitude Seismicity at a Reservoir in the Eastern Alps., Eng. Geology, 8, 99—106.
- 4) Drakopoulos, J. (1973) : Differences in the Strain Patterns in the Kremasta-Kastraki Dams, Greece, and Related problems. Int. Coll. COSERI, London.
- 5) Guha, S. K., Gosavi, P. D., Agrawal, B. N. P., Padale, J. G. and Marwadi, S. C., (1973) : Case Histories of Some Artificial Crustal Disturbances., Eng. Geol., 8, 57—77.
- 6) Shen Chung-kang, Chen Hou-chun, Chang Chu-han, Huang Li-sheng, Li Tzu-chiang, Yang Cheng-jung, Wang Ta-chun, Lo Hsueh-hai. (1973) : Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and their Effect on the Hsinfeng-kiang Dam., 1—44.
- 7) Gupta, H. K. and Rastogi, B. K. (1974) : Investigations of the Behaviour of Reservoir Associated Earthquakes., Eng. Geol., 8, 29—38.
- 8) Morrison, P. W., Stump, B. W., and Uhrhammer, R. (1976) : The Oroville Earthquake Sequence of August 1975., Bull. Seism. Soc. Amer., 66, 1065—1080.
- 9) Papazachos, B. C. (1974) : On the Relation between Artificial Lakes and the Associated Seismic Sequences, Eng. Geol., 8, 39—48.
- 10) Guha, S. K., Gosavi, P. D., Varma, M. M., Agarwal, S. P., Padale, J. G., and Marwadi, S. C. (1968) : Recent Seismic Disturbances in the Koyna Hydroelectric Project, Maharashtra, India, Report, CWPRS, India
- 11) Rothé, J. P. (1968) : Fill a Lake, Start an Earthquake., New Scientist, 11, July, 75—78.
- 12) Adams, R. D. (1974) : Statistical Studies of Earthquakes Associated with Lake Benmore, New Zealand., Eng. Geol., 8, 155—169.

- 13) Nikolaev, N. I. (1974) : The First Case of Induced Earthquakes During Construction of a Hydro-electric Power-station in the U.S.S.R., *Eng. Geol.*, 8, 107—108.
- 14) Singh, S., Agrawal, P. N., and Arya, S. A. (1976) : Filling of Ramganga Reservoir, Kalagarh, U. P. India and its Possible Influence on Seismic Activity, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 66, 5, 1727—1732.
- 15) Beck, J. L. (1976) : Weight-Induced Stresses and the Recent Seismicity at Lake Oroville, California, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 66, 4, 1121—1131.
- 16) Lahr, K. M., Lahr, J. C., Lindh, A. G., Bufe, C. G. and Lester, F. W. (1976) : The August 1975 Oroville Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 66, 4, 1085—1099.
- 17) 岡本舜三 (1975) : 貯水と地震の問題について, 第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1—16頁
- 18) 北信微小地震・地殻変動観測所 (1975) : 長野県奈川渡ダムにおける微小地震観測, 地震研究所彙報, 50, 47—51.
- 19) Hagiwara T., and Ohtake, M. (1972) : Seismic Activity Associated with the Filling of the Reservoir Behind the Kurobe Dam, Japan, 1963—1970, *Tectonophysics*, 15, 241—254.
- 20) Evans, M. D. (1966) : Man-made Earthquakes in Denver, *Geotimes*, 11 (5), 11—18.
- 21) 力武常次 (1976) : 地震予知論入門, 共立全書 209, 186—188.
- 22) 大竹政和 (1971) : 人工的に誘発された地震, 自然 3月号, 74頁
- 23) 1975年8月フランス, グルノーブルにおける IUGG 総会の講演による.
- 24) Fletcher, B., and Sykes, L. R. (1977) : Earthquakes Related to Hydraulic Mining and Natural Seismic Activity in Western New York State, *Jour. Geophys. Res.*, No. 26, 3767—3780. (受理1978年3月20日)